科学読本

音とオーディオ(11)

平田能睦

10章：雑音除去とエラー補正

コンピュータの登場により，信号処理は飛躍的な進歩を遂げました．ここで，オーディオ信号の処理としてSPレコードの雑音除去とCDの雑音ともいえるエラーの補正を取り上げます．その幕間を利用して，出るチャンスのなかった磁気録音と再生に触れます．この章の最後は帯域圧縮のお話です．

レコードの雑音除去

レコード針が音みぞをトレースするときに出る雑音，スクラッチ・ノイズは音みぞのゴミやキズのほかに，レコード盤の材質によっても発生します．材質の粗いSP（standard play）レコードのスクラッチ・ノイズはかなり耳障りです．

特別に開発された硬質塩化ビニールを使用して長時間録音が可能になったLPレコードでは，材質によるスクラッチ・ノイズはほとんど聴こえません．無音区間で出るシーという雑音はマスター・テープによる磁気録音特有のヒステレシス・ノイズ（略してヒス・ノイズ）が記録されたものです．このヒス・ノイズが音のよいLPレコードに加わることがなかったとしたら，CDの開発は少し遅れたかも知れません．

ところで，貴重な録音が残されているSPレコードについていえば，レコードを聴いた人は音質を損なうことなく耳障りなスクラッチ・ノイズを消すことはできないのだろうか，と思ったことでしょう．

耳を頼りに無音区間と思えるところで雑音を取り除く作業はできるとしても，信号と雑音の両方が聴こえるところは手が付けられません．こんなときはどうすればよいでしょうか．

スクラッチ・ノイズやヒス・ノイズのような雑音の周波数成分は広い帯域にわたって分布していますが，1つ1つの周波数成分の振幅はわずかなものです．これに比べると一般に楽音の周波数成分は少なく，その振幅は大きいのが特徴です．楽音と雑音が同じ大きさであっても，個々の周波数成分に分解するなら，その振幅には大きな差が出てきます．この差を利用すれば原理的には楽音と雑音を分離することができ，雑音を除けることになります．

では，何が問題でしょうか．楽音の周波数は時間とともに変化し，一定ではありません．このような時間的に周波数が変動する波形から1つ1つの周波数成分を検出するためには，その周波数が一定と見なせる短い区間で波形を順次切り出して分析することが必要です．しかし，短い波形から高い精度で周波数成分を検出することは周波数分析の長年にわたる課題で，簡単なことではありません．

たとえば，コンピュータによる周波数分析で広く利用されている高速フーリエ変換/FFTを使い，0.01秒の長さで波形を切り出して分析すると，周波数の精度は100 Hzになります．これを10 Hzの精度で分析しようとすると，分析区間の長さを10倍の0.1秒にしなければなりません．これでは楽音と雑音を分離できません．

短い波形の分析に適しているといわれているウェーブレット変換も精度の点ではFFTと大差ありません．そこで，以前ピアノの音の分析で用いた方法を使ってみます．

基本周波数を440 Hzとする第5調波までの5つの正弦波を加え合せて作った信号波形に，パワーのほぼ等しい白色雑音を加えた時間長0.01秒の波形，これを非調和フーリエ解析を使い周波数分析します．

パワーの大きなものから正弦波が順次検出されます．検出された正弦波を加え合せると，次第に信号波形が姿を現わしますが，これをさらに続けて行くと，もとの雑音の加わった波形に近づいて行きます．どこで止めたらよいのでしょうか．

実際に雑音除去のための波形解析を行なうときには，何本の正弦波で信号が構成されているかわかってい

動物たちの耳

人間の耳で知覚できる振動を音とすると，その音の周波数はせいぜい20 Hzから20000 Hzの範囲にすぎません．しかし，動物の中にはその範囲をはるかに超えた周波数の振動を聴いて活動しているものもいます．高い方ではコウモリが12万Hz，イルカが15万Hzまでの超音波を聴き取ることができます．コウモリやイルカは超音波を発し，戻ってくる反射音を聴いて，まるで物を見るかのように物体を識別することができます．コウモリの耳は暗闇でもエサを捕えられるように長い年月をかけて進化した，という学者もいますが，暗闇で目を訓練する方がはるかに容易だったでしょう．では，

低い方についてはどうでしょうか．世界野生生物基金の会報「フォーカス」によると，象は，不可聴音で互いに連絡を保つことが知られた最初の陸生哺乳動物です．象は何km離れていてもすぐにお互いを見つけますが，それは科学者たちの長年のなぞでした．

超低周波の音は樹木などに遮られることなく非常に遠くまで伝わります．2004年12月，スマトラ沖の地震で発生した巨大津波によって大勢の人が犠牲になりましたが，1群の象は津波の襲来をあらかじめ察知して海岸を離れて行きました．沖から来る超低周波を聴いて避難したようです．人間の耳にはまったく聴こえませんが，きっとゾーとする音だったのでしょう．

磁気録音と再生

LPレコードのノイズの元凶はヒス・ノイズと出たところで，磁気テープ録音と再生について触れておきましょう．

インスタント・コーヒーのなかったころ，電磁気学を学ぶ人にとってマックスウェルといえば，学習の最終段階で教えられるマックスウェル（J. C. Maxwell，1831～1879）の方程式のことでした．4つで1組の方程式は美しく，近寄り難いものでしたが，その物理的な意味は，少し工夫すれば砂鉄を磁石につけて遊ぶ子供にも説明できるところがあります．

磁気記録再生の理論は1960年代半ばまでには完成したように思われました．しかし，実測した結果と一致しないところがありました．再生ヘッドの出力周波数特性が低域で理論上の特性よりも急に小さくなり，その説明ができませんでした．オープン・リールのテープレコーダでおよそ50 Hz以下のところで生じる差なので，大した問題ではないといえばそれまでのことですが，こうしたことは研究の好きなものにとって好奇心を燃やす火種になります．

マックスウェルの方程式の1つは，磁力線は天気図の等圧線のように交差せず閉曲線になるということです．この条件に従って，テープから生じた磁力線が再生ヘッドを通って一巡する様子を描いてみると，低い周波数では磁力線が再生ヘッドからはみ出るようになることがわかります．

テープの再生スピードをv，テープに接する再生ヘッドの幅を2aとすると，その限界となる周波数はv/2aで与えられます．この限界周波数以下で再生ヘッドの出力は急激に小さくなります．難しい式を使うこともなく問題は解決しました．

45年も前のことですが，研究の事始めとしてこの問題は恰好なテーマでした（電気通信学会，電音研1965年12月）．

非常に低い周波数の音が磁気テープに記録されると，再生ヘッドの出力でいちじるしくひずんだ波形になり，その高調波が特異な音となって聴こえてきます．録音の際に耳には大した邪魔ではないと思った低周波数の音が，こうして大切な録音を台なしにしてしまうことがあります．

CDのエラー補正

小さな円盤（disk）に高密度（compact）に信号を記録したCDは，LPレコードよりゴミやキズの影響を受けやすいのですが，こうしたことはあらかじめ考慮して信号を記録しています．

CDでは信号はすべて0か1の値で表わし，再生の際に検出した値が真に0なのか，あるいは1なのか，という判断をします．1つの点の値を眺めていてもそれが正しいかどうか判断することはできないので，判断できるように余分な値を0と1を用いて加えておきます．このようにして検出した値の真偽を調べ，0が誤りなら1，1が誤りなら0に正すことをエラー訂正と呼んでいます．

エラーの発生が続くとその訂正ができなくなり，つぎに補正という手段が用いられます．エラー訂正は誤りを完全に正すのに対して，エラー補正は誤差を許容します．銀行の大型コンピュータでエラー補正を使ったら問題になりますが，オーディオにおいては聴感上わからなければそれでよいわけです．

エラー補正はどのようにするのでしょうか．どこまで補正できるのでしょうか．聴いてほんとうにわからないのでしょうか．これらの点について考えてみましょう．

1列に並んだ生徒の丈／身長の変化を波形とすると，生徒の間隔はサ

より少ない3次式で波形の近似をする補間法がCDのエラー補正として最善であるといえます.

とはいえ，汚れやキズがあまりひどいと，エラー補正も対応できなくなります．これはCDの記録方式の問題ではなく，その取扱いかたの問題ですから，生半可な補正はしない方がよいでしょう．新しいものを購入してください.

ところで，エラー補正された音は聴いてもわからないのでしょうか．補正されなければインパルス状の雑音が聴こえるでしょうが，CDのエラーは，補正されると，“これがそうだ”と聴き分けられません.

しかし，補正の誤差は波形のひずみになるので，アンプによって生じるわずかなひずみを聴き取ることができるなら，エラー補正の量が増せばそれを音質的な変化として検知できるでしょう．CD自体に何らかの手を加えると音質が変わる，ということがあるとすれば，まず，エラーの増減がその要因と考えられます.

帯域圧縮

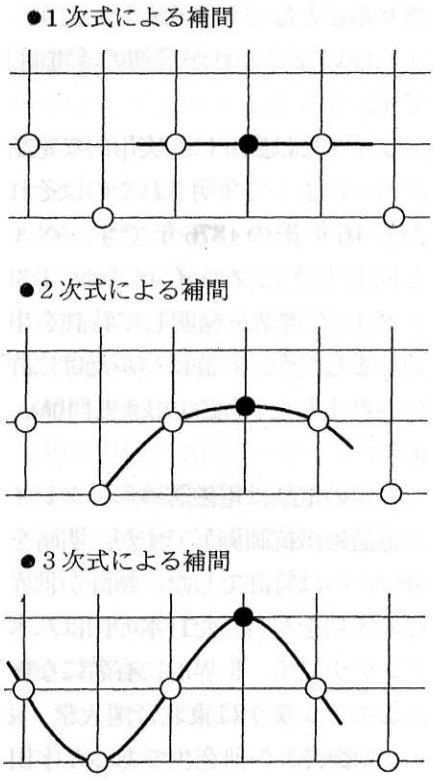
狭い所に荷物を収納する秘訣は，あまり重要でないものを思い切って処分することです．あれこれ惜しんでいては，いつまで経っても納まりません.

狭いところに信号を詰め込む技術を帯域圧縮といいます．従来の電話は人の声の300 Hz以下と3,300 Hz以上の周波数成分を捨て，周波数帯域幅3 kHzで音声を伝送しています．この音声信号波形を1サンプル8ビット，1秒間8,000サンプルのデジタル信号にすると，1秒当たり64 kビットになりますが，携帯電話は1秒当たりわずか3.45 kビットで音声信号を伝送しています．周波数帯域幅に換算すると160 Hzに帯域圧縮したことに相当します.

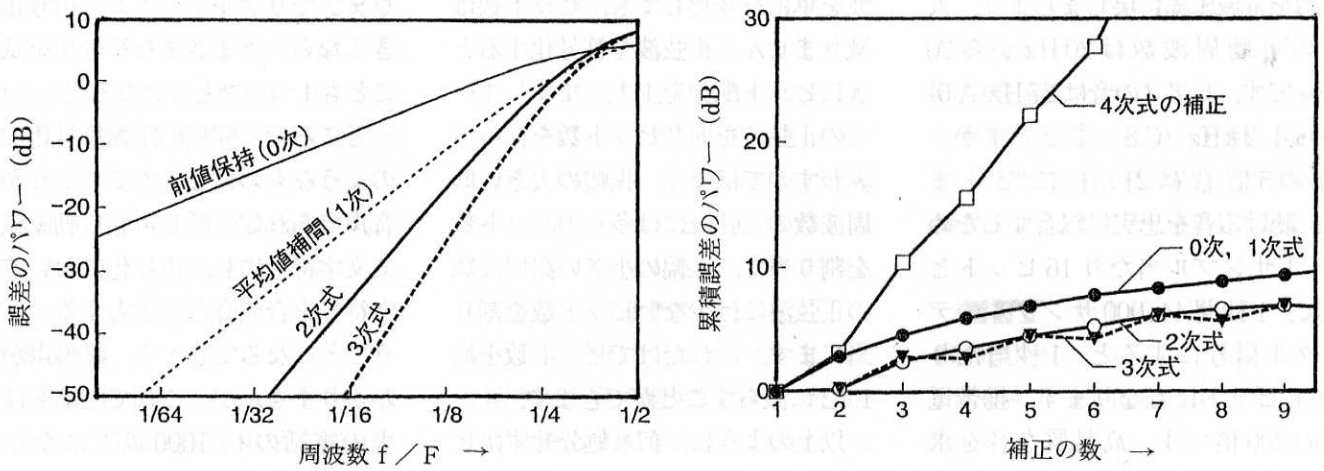
音声の周波数成分を単純に切り捨て160 Hzの帯域幅で伝送したなら，何を話しているかまったくわからないでしょう．携帯電話が3.45 kビットで音声通信を可能にしているのは，音声波形を符号化して送っているからです．その便利さと価格は3.45 kビットで可能になったといわれれば，音質が多少悪くても我慢できるでしょう.

ここで，電話について触れておきましょう．電話の発明者はベル（A. G. Bell, 1847～1922）とされていますが，ドイツの若い物理学者ライス（J. P. Reis, 1834～1874）は1860年に声による膜の振動を電流の強弱に変える送信器と，電流の変化を振動に変えて声に戻す受話器からなる装置を発明しました．ソーセージの薄い膜とコイルと縫針，そしてヴァイオリンを使った奇妙な装置で，ライスはこれをテレフォン［独］と呼びました.

テレ/teleは「遠方」，フォン/phon［独］は「音」という意味があります．当時のドイツの社会環境ではライスの発明をそれ以上に発展



〈10・5図〉方程式による補間．1次式は2つ，2次式は3つ，3次式は4つの白丸の値を使って補間値を求める



〈10・6図〉エラー補正の特性．補正誤差の周波数特性(左)と1つおきに生じたエラーを補正したときの累積誤差の増加特性(右)．下はサンプリング周波数

させることはできませんでしたが，まちがいなくこれが最初の「電話」です．

ライスとは独立に，実用的な電話がベルによって発明されたのはそれから16年後の1876年です．ベルと同じときにグレイ（S. Gray，1781～1861）も電話を発明して特許を申請しましたが，特許はベルだけに許可されました（「電気の技術史」山崎，山本）．

ベルの電話は電磁誘導形，グレイの電話は抵抗制御形ですが，明暗を分けたのは特許でした．特許が世界での成功を左右した日本の例は八木アンテナです．世界的に有名になったこのアンテナは東北帝国大学（現在の東北大学）の研究生であった宇田新太郎によって発明されたものです．早朝から夜遅くまで実験を続けて完成した画期的なアンテナは，教授がこれを内外に出願したためにその名で知られるようなりました．宇田はこの発明から1円も受けることはなかったようです（菊谷，電気通信学会誌，1976年9月）．

こうした話を聞くと，特許は悪いもののように思われるかもしれませんが，世知にたけた人たちの中で世事に疎い研究者を守る唯一の砦となっているのは，ほかならぬ特許制度です．

話を帯域圧縮に戻しましょう．人間の可聴周波数は20 Hzから20 kHzです．ピアノの音は27 Hz(A 0)から4.2 kHz（C 8）までですが，C 8の5倍音は21 kHzになります．聴ける音を忠実に録音するために，1サンプル当たり16ビットとして，1秒間44,000サンプルのデジタル信号にすると，1秒当たり700 kビットにもなります．携帯電話の200倍です．高品質な音を求めるオーディオと，話ができればよいとする携帯電話の差は，この200倍という数で表わされます．

このような音質を重視するオーディオでの帯域圧縮（符号化）は電話の圧縮方式と異なるものの，信号波形を分析して符号化するというところは同じです．符号化を1つの例で説明しましょう．

正弦波の波形を1サンプル16ビットとして512サンプルで表わしたとすると，これをそのまま記録した場合16×512ビット，つまり8,192ビットが必要になります．

この正弦波を周波数と振幅と位相の3つの値で表わし，その値をそれぞれ16ビットで表示すると，正弦波は16×3ビット，すなわち48ビットで符号化され，波形を512点のサンプル値で記録する場合に必要なビット数8,192の1/170のビット数で表わすことができます．

1つの正弦波ならこのようにして簡単に圧縮符号化することができますが，音楽信号の波形は正弦波よりもはるかに複雑です．このような波形を正弦波の合成で表わそうとすると，サンプル数の半分の数の正弦波が必要になります．たとえば，512サンプルで与えられた波形を表わすためには256個の正弦波が必要です．これが離散フーリエ変換です．

このフーリエ変換で得られた正弦波を単に符号化しても，ビット数は減りません．正弦波を符号化するときにビット配分を工夫します．すべての正弦波を同じビット数を使って表わすのではなく，振幅の大きい低周波数の正弦波には多くのビット数を割り当て，振幅の小さい高周波数の正弦波には少ないビット数を割り当てます．これだけでビット数を約1/2に減らすことができます．

以上のように，何も処分せずにビット配分を工夫して詰め込む方法から，多少感知されてもよいから，重要でないところを処分して詰め込む方法まで，圧縮符号化はその目的に応じていろいろな方法が考えられます．ただし，いずれの方法も音楽信号に戻す複号化が必要です．ソフトウェアでリアル・タイムに復号化できるなら，さまざまな符号化を試すことも1つの楽しみになるでしょう．

ところで，究極の圧縮符号化はどのようなものになるのでしょうか．音声であれば，話し声を自動認識して文字符号にし，復号化において文字符号を合成音声で出力する，ということになるでしょう．誰の声かはわかりませんが，これで圧縮率は従来の電話の1/1000以下になります．

エラー訂正，もう一つの方法

印刷機が発明される前の時代，本は人の手によって書き写されました．どれほど注意深く作られたとしても写本にはわずかな誤りが入り込みます．このような誤りはどのようにして見付け出し訂正することができるでしょうか．複数の写本の同じ個所で誤りが生じる確率は極めて小さいので，写本が多ければそれらを比較することにより，誤りを見付けて完全に訂正することができます．

非常に古い本である聖書がヘブライ語で書き始められたのはいまから3,500年前．原本は残されていませんが，ヘブライ語聖書のいろいろな部分の古い写本はいまでも1,700以上あり，これにより写字生たちの犯したわずかな誤りも完全に訂正することができます．

こうして聖書は書かれたときと実質的に同じ内容でわれわれまで伝えられている，とフレデリック・ケニヨン卿は述べました．